



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## PRODUKTIVNÍ FRÉZOVÁNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN

PRODUCTIVE MILLING OF ALUMINUM ALLOYS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Dvořák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

BRNO 2016

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Jakub Dvořák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Produktivní frézování hliníkových slitin

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je podrobně popsána technologie frézování a materiály používané pro výrobu řezných nástrojů. Dále jsou popsány a rozděleny hliníkové slitiny. Experimentální část je zaměřena na vliv řezných podmínek na výslednou strukturu a jakost obrobeného povrchu.

#### Cíle bakalářské práce:

1. Charakteristika technologie frézování.
2. Charakteristika řezných materiálů.
3. Charakteristika hliníkových slitin.
4. Experimentální část.
5. Vyhodnocení experimentu.

#### Seznam literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235s. ISBN 978-80-254-2250-2.

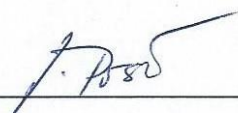
FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. Nástrojové oceli. 1. vyd. Brno: Dům techniky Brno, 1994. 234 s.

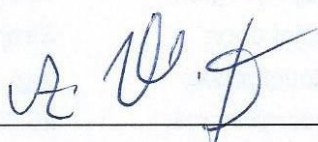
PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 3. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na frézování slitin hliníku, kde je nejprve popsána technologie frézování, dále pak řezné materiály a hliníkové slitiny. Hlavní částí práce bylo provedení experimentu. Experiment byl zaměřen na vliv řezných podmínek na výslednou jakost povrchu s ohledem na strojní čas. Frézován byl hliníkový obrobek různými řeznými rychlostmi a různými posuvy na zub, přičemž byla zkoumána jakost povrchu a byly spočteny strojní časy. Experiment nám ukázal, zda se vyplatí použít vyšší řezné rychlosti a posuvy na zub, při dodržení nastavené limitní hodnoty drsnosti povrchu s ohledem na strojní čas. Z Experimentu vyplývá, že s rostoucím posuvem na zub se zhoršuje jakost obrobeného povrchu, ale strojní čas se snižuje.

## Klíčová slova

Frézování, slitiny hliníku, hliník, produktivnost, řezné materiály, obrábění, drsnost povrchu, strojní čas

## ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on milling of aluminum alloys, where the technology of milling is described in the first place, then the cutting materials and aluminum alloys. The main subject of the work was to carry out the experiment. The Experiment was focused on influence of cutting conditions on the final quality of the surface with regard to machine time. The aluminum workpiece was milled at different cutting speeds and various feed per tooth. At the same time the quality of the surface was examined and machine times were calculated. The Experiment showed us, whether it pays to use higher cutting speeds and feed per tooth, keeping the set of limited values of surface roughness with respect to the machine time. The result of the experiment is the following - the increasing feed per tooth deteriorates the quality of machined surface, but machine time is reduced.

## Key words

Milling, aluminum alloys, aluminum, productivity, cutting materials, machining, surface roughness, machine time

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DVOŘÁK, J. *Produktivní frézování hliníkových slitin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2017. 53 s. 2 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

**PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Produktivní frézování hliníkových slitin** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Jakub Dvořák

**PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D., za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále pak děkuji panu Mgr. Michalu Jílkovi a panu Jiřímu Čechovi za pomoc s experimentální částí.

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	7
---------	------------------	------	---

## OBSAH

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ .....	10
1.1 Kinematika frézování.....	10
1.2 Rozdělení frézování .....	11
1.2.1 Válcové čelní frézování .....	11
1.3 Frézovací nástroje .....	12
1.4 Obráběcí stroje .....	14
1.4.1 Konzolové frézky.....	15
1.4.2 Stolové frézky .....	15
1.4.3 Frézky rovinné .....	15
1.4.4 Speciální frézky .....	15
1.4.5 CNC obráběcí centra.....	15
1.5 Upínání nástrojů.....	16
1.6 Upínání obrobku .....	18
2 CHARAKTERISTIKA ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ .....	19
2.1 Rozdělení řezných materiálů .....	19
2.2 Řezné materiály pro frézování hliníkových slitin.....	20
2.2.1 Slinuté karbidy .....	20
2.2.2 Supertvrdé řezné materiály .....	22
3 CHARAKTERISTIKA HLINÍKOVÝCH SLITIN .....	24
3.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin .....	24
3.1.1 Fyzikální vlastnosti hliníku.....	24
3.2 Rozdělení a označování slitin hliníku a jejich charakteristika.....	25
3.2.1 Slévárenské slitiny hliníku.....	25
3.2.2 Hliníkové slitiny určené pro tváření .....	27
3.2.3 Automatové slitiny.....	29
3.3 Tepelné zpracování slitin hliníku.....	29
3.3.1 Žihání slitin hliníku.....	29
3.3.2 Vytvrzování slitin hliníku .....	30
3.4 Obrobitelnost hliníkových slitin .....	30

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	8
---------	------------------	------	---

3.4.1	Třída obrobitelnosti.....	31
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	32
4.1	Obráběný materiál.....	32
4.2	Obráběcí nástroj.....	33
4.3	Obráběcí stroj.....	34
4.4	Průběh experimentu .....	37
5	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU.....	40
5.1	Vyhodnocení drsnosti povrchu při frézování různými řeznými podmínkami .....	40
	ZÁVĚR .....	44
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	45
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	49
	SEZNAM PŘÍLOH.....	51



## ÚVOD

Dnešní doba klade vysoké nároky na výrobky jako takové, například co se kvality a rychlosti výroby týče. Není tomu jinak ani ve strojírenství, kde je důležité vyrobit výrobek za co nejmenší možné náklady tak, aby byla zachována jeho funkčnost a spolehlivost. Produktivní obrábění zahrnuje řadu faktorů, jimiž jsou například strojní čas, volba stroje a nástroje, v neposlední řadě stanovení řezných podmínek, výsledná kvalita obrobeneho povrchu a další. Na základě strojírenské technologie jako vědy, docílíme maximální efektivnosti výroby součástí v malosériové či velkosériové výrobě a zaručíme tak konkurenceschopnost.

Technologie frézování, spadající do třískového obrábění, je jedna z nejvyužívanější technologie spolu se soustružením. Zhruba ve druhé polovině 20. století enormně vzrostly požadavky na kvalitu, přesnost a z důvodu toho, vznikly číslicově řízené obráběcí stroje, které měly, ve srovnání s konvenčními stroji, větší produktivitu. Ovšem i postupy u frézování, soustružení a dalších technologií, které se používaly před zhruba 10 lety, jsou zaostalé ve srovnání s dnešní dobou [2].

Frézování slitin z neželezných kovů, jako například hliníkových slitin, se využívá v automobilovém, a hlavně leteckém průmyslu, z důvodu požadovaných mechanických vlastností a nízké hmotnosti. Slitiny hliníku jsou v průmyslu nejpoužívanější slitinou neželezných kovů. Při obrábění těchto slitin je důležitý správný výběr nástrojového materiálu, druhu chlazení a volba řezných podmínek [29].

## 1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE FRÉZOVÁNÍ

Podstatou technologie frézování je, že se odebírá materiál vícebřitým nástrojem, řez je tedy přerušovaný a tloušťka třísky není konstantní. Frézováním se vytváří obvykle rovinné plochy, avšak na moderních CNC (Computer Numerical Controlled) strojích lze vyrobit i tvarově složité plochy a dráha nástroje nabývá libovolné křivky. Nástroj, tedy fréza, vždy vykonává rotační pohyb, což je hlavní řezný pohyb charakterizovaný řeznou rychlostí značenou  $v_c$ . Fréza je upevněna ve vřetenu stroje. Stroj je nazýván frézkou. Součást, tedy obrobek, zastává zpravidla přímočarý pohyb (posuv), který popisuje posuvová rychlost značená  $v_f$  [1, 2].

### 1.1 Kinematika frézování

Kinematiku při frézování určují hlavní parametry řezného procesu jako je například řezná rychlost, posuv na zub či posuv na otáčku, šířka záběru ostří a další.

Řezná rychlost  $v_c$  (vzorec 1.1) je rychlost na obvodu břitu a popisuje hlavní rotační pohyb frézy. Pro obrábění slitin hliníku se volí řezná rychlost vyšší a posuv naopak nižší, z důvodu požadavku nízké drsnosti povrchu. Řezné podmínky všeobecně, se stanovují dle druhu frézování (hrubování či dokončování) s ohledem na šířku záběru ostří, vzhledem k jakosti požadovaného povrchu a samozřejmě výkonu na vřetenu frézky [2, 3, 4].

Hodnota řezné rychlosti  $v_c$  je následující podle vzorce (1.1) [1]:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [m/min] \quad (1.1)$$

Vedlejší pohyb, tedy posuvová rychlost (vzorec 1.2) je rychlost obrobku vůči nástroji. Udává, jakou obrobek urazí vzdálenost za jednu minutu. U konvenčního frézování se posuv uskutečňuje ve třech osách x, y, z. Hlavní částí posuvového pohybu a dalším velmi důležitým faktorem, který patří rovněž do kategorie doporučených řezných podmínek spolu s řeznou rychlostí, je posuv na zub značený  $f_z$ . Je to vzdálenost, kterou zdolá obrobek během záběru zubu. Vedle posuvu na zub, je možné počítat i s posuvem na otáčku  $f_n$  dle vzorce (1.3). Posuvová rychlost závisí na druhu frézy, hodnotě posuvu na zub a počtu zubů dané frézy. Tyto vztahy vypočítáme dle vztahů 1.2 až 1.3 [1, 2]

Výpočet rychlosti posuvu  $v_f$  je spočten dle vztahu (1.2) [1]:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n [mm/min] \quad (1.2)$$

Vztah pro výpočet posuvu na otáčku  $f_n$  je dle vzorce [1]:

$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm]} \quad (1.3)$$

Například doporučené řezné podmínky pro stopkové frézy ze slinutého karbidu dle [17] jsou uvedeny v tab. 1.1. Obráběným materiálem jsou slitiny hliníku. Hodnoty se mohou měnit s ohledem na výrobce konkrétní frézy.

Tab. 1.1 Doporučené řezné podmínky pro stopkové frézy ze slinutého karbidu [17].

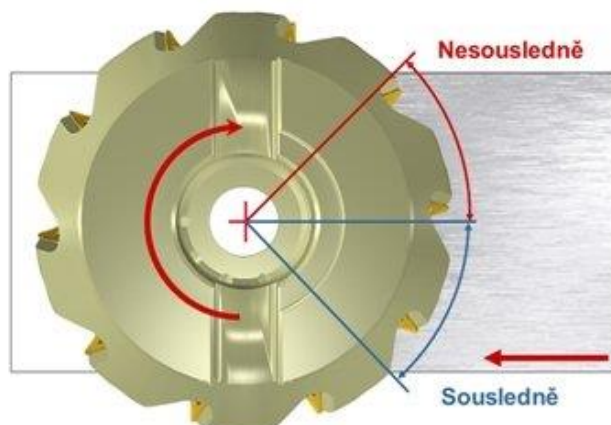
Materiál	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	Posuv na zub $f_z$ [mm] (pro Ø frézy 10 mm)
Slitiny hliníku – dlouhá tříska (<12 % Si)	550	900	0,05
Slitiny hliníku – krátká tříska (>12 % Si)	400	250	0,05

## 1.2 Rozdělení frézování

Podle usazení břitů na nástroji a koordinací pohybů obrobku vůči nástroji, se frézování dělí na válcové a čelní. Přičemž válcové frézování lze rozdělit na sousledné a nesousledné. Dále z těchto způsobů lze vyvodit frézování okružní a planetové. Avšak v praxi se často používá kombinace čelního a válcového frézování, tedy čelní válcové frézování [1, 2].

### 1.2.1 Válcové čelní frézování

Jedná se o kombinaci válcového a čelního frézování během řezného procesu. Posuv se koná v radiálním i axiálním směru. Zuby frézy jsou umístěny po obvodu i na čele nástroje. U tohoto typu frézování se vyskytuje sousledná i nesousledná poloha zároveň. Část nástroje frézuje sousledně a část nesousledně obr. 1.1 [5]. Největší průřez třísky se nachází na rozhraní sousledného a nesousledného směru. Právě tento typ frézování se využije v experimentální části [3].



Obr. 1.1 Schéma válcového čelního frézování [5].

### 1.3 Frézovací nástroje

Fréza je vícebřitý rotační nástroj, který každým břitem odebírá část materiálu. Kvůli široké škále uplatnění technologie frézování, existují různé druhy fréz, které se rozdělují do určitých skupin dle různých kritérií [6].

Třídění nástrojů dle [6, 7]:

#### I. Umístění zubů na tělese nástroje

- válcové – zuby na válcové ploše,
- čelní – zuby na čelní ploše,
- válcové čelní – zuby na čelní i válcové ploše,
- kotoučové – zuby na válcové ploše a obou čelech,
- úhlové jednostranné – zuby na jedné straně kuželové plochy,
- úhlové oboustranné – zuby na dvou kuželových plochách,
- tvarové – s negativním tvarem obráběné plochy.

#### II. Tvaru zubů frézy

- frézované zuby,
  - s lomenou hřbetní plochou,
  - s jednoduchou hřbetní plochou,
- podtáčené zuby,
  - podsoustružením,
  - podbroušením,
- lité zuby.

#### III. Nástrojového materiálu zubu

- zuby z rychlořezné oceli,

- ze slinutého karbidu,
- z cermetu,
- z řezné keramiky,
- ze supertvrdých řezných materiálů,
  - PKNB (polykrystalický kubický nitrid bóru),
  - PKD (polykrystalický diamant).

#### **IV. Průběhu ostří vzhledem k ose rotace**

- s přímými zuby,
- se šikmými zuby,
- se zuby ve šroubovici (klidnější a plynulejší proces řezání),
  - pravotočivá,
  - levotočivá.

#### **V. Podle smyslu rotace (při pohledu shora od vřetene stroje)**

- pravořezné (ve směru hodinových ručiček),
- levořezné (proti směru hodinových ručiček).

#### **VI. Konstruktivního uspořádání**

- frézy celistvé (monolitní) – celé vyrobeny z řezného materiálu,
- frézy s vkládanými zuby – těleso je z konstrukční oceli a zuby z řezného mat.,
- frézy složené – z několika fréz,
- frézy dělené – pro nastavení fréz na stejný rozměr.

#### **VII. Způsobu upnutí**

- nástrčné (obr. 1.2 a),
- se stopkou (obr. 1.2 b),
  - válcovou,
  - kuželovou.

#### **VIII. Počtu zubů vzhledem k průměru frézy**

- jemnozubé,
- polohrubozubé,
- hrubozubé.



a)



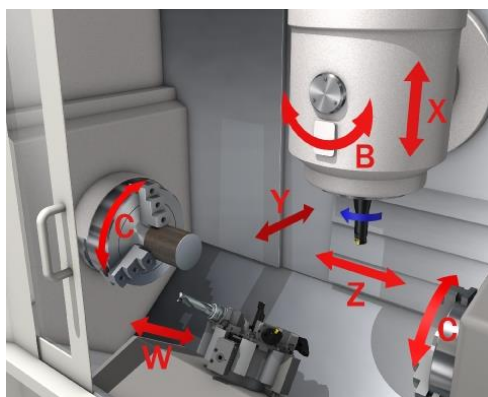
b)

Obr. 1.2 Fréza válcová čelní [8, 9]: a) nástrčná, b) s válcovou stopkou a ploškou WELDON.

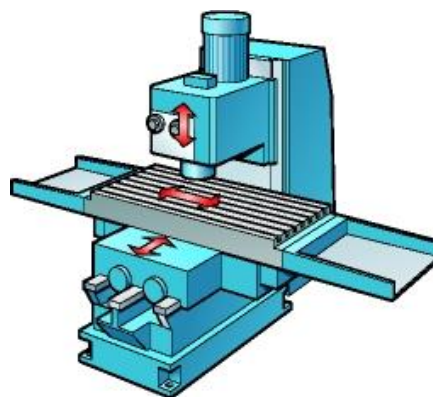
Pro praktickou část se volí fréza válcová čelní, monolitní s válcovou stopkou a ploškou WELDON. Materiál zvolené frézy je slinutý karbid bez povlaku.

#### 1.4 Obráběcí stroje

Frézky se vyvíjejí ve všech směrech, a to i co se příslušenství týče. V dnešní době lze stále častěji pozorovat nárůst používání víceúčelových obráběcích center řízených počítačem. Ty poskytují možnost obrábět různé složité tvary na jedno upnutí s velmi vysokou přesností a jakostí povrchu. Frézky se mohou rozdělit do několika kategorií s ohledem na různá hlediska. Obvykle se však dělí na 4 základní typy – **konzolové, stolové, rovinné a speciální** (obr. 1.3 b). Jako pátou skupinu lze zařadit CNC obráběcí centra ať už tříosá či pětiosá (obr. 1.3 a). Dále lze frézky rozčlenit do dvou skupin s ohledem na jejich automatizaci – ovládané ručně a řízené programově. Velikost stroje udává šířka upínací plochy stolu a velikost kužele ve vřetenu. Důležitá kritéria pro výběr frézky jsou například délka pohybu stolu či vřeteníku, rozsah otáček vřetena a posuvů nebo výkon elektromotoru [3, 6, 12].



a)



b)

Obr. 1.3 Srovnání stupňů volnosti [11]: a) pětiosé víceúčelové obráběcí centrum, b) klasická konvenční tříosá frézka.

#### 1.4.1 Konzolové frézky

Tyto frézky dostaly pojmenování díky konzoli, která se posouvá po stojanu. Stroj je vybaven příčným stolem a na něm umístěným podélným stolem. Pracovní stůl je obvykle vybaven T drážkami. Stůl se pohybuje díky šroubům a maticím ve třech pravoúhlých souřadnicích vzhledem k nástroji. Tento druh frézky se většinou používá k obrábění rovinných a tvarových ploch u menších a středně velkých obrobků. Konzolové frézky mají tři obměny – vodorovné, svislé a univerzální. Ke každé konzolové frézce existuje celá řada pomocného příslušenství jako je otočný stůl, dělicí přístroje, obrážecí hlava a další [6, 10, 12].

#### 1.4.2 Stolové frézky

U této frézky, na rozdíl od konzolové, je posuv ve svislém směru zajištěn vřetenem stroje. Stůl podélný a příčný jsou pevně nastaveny v dané výšce na základně stroje a pohybují se pouze ve vodorovné rovině. Častěji jsou rozměrnější (pro objemnější a těžší obrobky) tužší a přesnější ve srovnání s frézou konzolovou [6, 12].

#### 1.4.3 Frézky rovinné

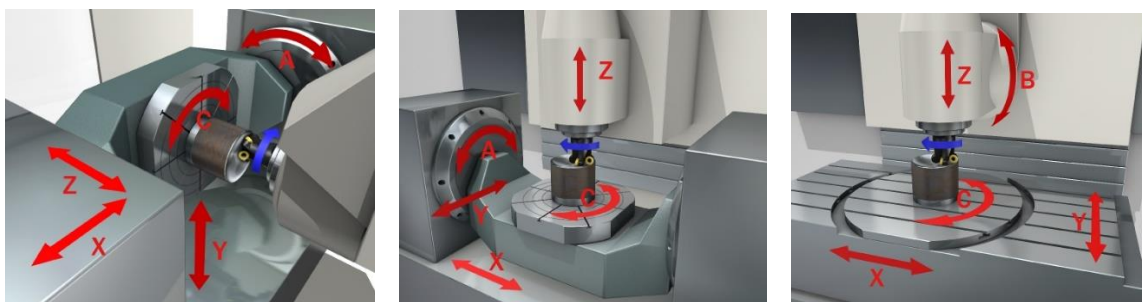
Rovinné frézky mají masivní konstrukci a řadí se mezi nejvýkonnější frézky. Díky jejím velký rozměrům lze obrábět velmi těžké a rozměrné součásti při zachování značné geometrické přesnosti. Pohyb pracovního stolu je vykonáván pouze v podélném směru. Svislý pohyb má na starosti vřeteník a příčný pohyb vysouvací pinola. Rovinné frézky mohou mít i více vřeteníků – vodorovný a svislý [6, 10, 12].

#### 1.4.4 Speciální frézky

Do této odnože spadají zejména frézky pro výrobu ozubení (odvalovací frézky), závitů, drážek, vaček apod. [6, 10].

#### 1.4.5 CNC obráběcí centra

CNC obráběcí centra neboli počítačem řízený obráběcí stroj určený k obrábění podle předem připravených NC programů. Frézovací centra lze rozdělit na stroje s horizontální a vertikální osou vřetene. Mohou být tři – až pětiosá. Vřeteno a upínací stůl u pětiosého centra umožňuje kombinaci pohybů po osách X, Y, Z plus naklánění A, B, přičemž naklánět se může jak vřeteno, tak stůl (obr. 1.4). Slouží k obrábění většinou nerotačních, tvarově složitých součástí. Mají široké uplatnění díky snížení strojních časů, větší produktivitě a možnosti použití daleko vyšších řezných podmínek. Ovšem je třeba vždy zvážit návratnost před koupí takového stroje, neboť náklady na pořízení a údržbu jsou vysoké. Proto je často otázkou, zda součást vyrobí na „starších“ strojích nebo zda použít moderní stroje [10, 11].



a)

b)

c)

Obr. 1.4 Rozložení pohybů CNC obráběcího centra [11]: a) horizontální obráběcí centrum 5-osé, b) vertikální obráběcí centrum s pátou A-osou, c) vertikální obráběcí centrum s pátou B-osou.

### 1.5 Upínání nástrojů

Upínání fréz je různé, avšak všechny jsou následně uváděny do pohybu přes kroutící moment vřetena frézky. Upínání nástroje se liší podle dané konstrukce frézy. Pokud má být výrobek obráběn s co největší přesností, záleží, krom ostatních parametrů (řezné podmínky, materiál obrobku, tuhost stroje a další), také na kvalitě upnutí frézy. Na upínání fréz se kladou vysoké nároky s ohledem na tyto vlastnosti [12, 13]:

- pevnost v ohybu,
- dynamické vyvážení,
- vysoké upínací síly k přenosu kroutícího momentu,
- přesné upnutí s minimálním házením,
- tlumení vibrací,
- schopnost přivádět řeznou kapalinu,
- jednoduchost upnutí a odepnutí,
- ohled na bezpečnost práce.

### Upínání fréz s válcovou stopkou

Frézy s válcovou stopkou lze upnout pomocí upínací hlavice s kleštinou nebo sklíčidlem s upínacím pouzdrem. Tyto metody jsou ovšem v dnešní době nahrazovány hydraulickým, tepelným, či polygonálním způsobem upnutí [10, 13].

Hydraulické upínače fungují na principu hydromechanické síly. Ovládním utěsněného pístu či šroubu vzniká hydraulický tlak kapaliny. Kapalina se tak rozpíná a tlačí na pouzdro, které je mírně deformováno. Touto deformací tak dojde k obepnutí nástroje. Upínací pouzdro je opatřeno drážkami, do nichž jsou vtačovány nečistoty pomocí velkého měrného tlaku. Nečistoty mohou negativně ovlivnit přesnost upnutí. Hydraulické upínání je lehce přeměnitelné na jiný průměr stopky frézy díky použití přesných vložek [10, 13].



Teplné upínače pracují na základě změny teplotní roztažnosti materiálů. Upínač je vyroben ze speciálního materiálu, jehož ohřevem dojde ke zvětšení otvoru. Upínač se ohřeje ve speciálním zařízení pomocí magnetického pole cívky vysokofrekvenčního generátoru. Teplota se pohybuje okolo 250–350 °C. Vlivem zvýšení teploty se zvětší průměr díry (setiny milimetru) a nástroj je možné do díry upínače vložit. Vzhledem k tomu, že nástroj má pokojovou teplotu, je zaručen rozdíl ve velikosti průměrů. Chceme-li naopak nástroj odepnout, ohříváme upínač i frézu zároveň. Díky rozdílnému materiálu upínače a frézy (nejčastěji rychlořezná ocel nebo slinutý karbid), lze využít fyzikální vlastnost součinitele délkové roztažnosti (průměr upínače se zvětší více než průměr frézy). Frézu lze posléze snadno vyjmout. Upínač má jednoduchou konstrukci. Lze použít i frézy se systémem upínání Weldon či Whistle. Délka ohřevu se pohybuje okolo 5 sekund. Radiální upínací tlak je mnohem větší než u upínání mechanickým či hydraulickým principem. Upnutí je velmi tuhé, přesné a jednoduché. Vhodné k vysokorychlostnímu obrábění. Možnost upnutí je od 3 do 50 mm. Tento druh upínání má však značnou citlivost na správně přiřazený průměr a toleranci upínací stopky [10, 13, 14, 15].

Silově deformační upínání využívá pružné (elastické) deformace tělesa upínače. Působení vnějších sil zajistí změnu tvaru vnitřní dutiny. Nejznámější je zřejmě systém TRIBOS od firmy Schunk. Pokud je stav upínače uvolněný, má díra zhruba polygonální (mnohoúhelníkový) tvar. Při použití speciálního přípravku (vnějších sil) dojde k deformaci polygonálního průřezu na kruhový průřez. Tehdy se vloží do otvoru stopka nástroje a tlak se uvolní. Tím se dutina vrátí do původního tvaru. Výhodou těchto upínačů je vysoká radiální tuhost. Systém nevyžaduje žádnou údržbu kvůli absenci pohyblivých dílů. Ty se neopotřebovávají a životnost nástroje je tak vyšší, opotřebení naopak menší [10, 13, 14, 15].



Obr. 1.5 Hydraulický upínač s redukční kleštinou [35].

### Upínání fréz s kuželovou stopkou

Je-li kužel upínací stopky frézy a dutiny ve vřetenu stejný, může se nástroj upnout přímo do vřetena stroje. Jsou-li kužely rozdílné, je nutné použít redukční pouzdro. Kuželová stopka může být buď ISO nebo MORSE [12, 14].

### 1.6 Upínání obrobku

Upnutí obrobku je taktéž velmi důležité. Je nutné zajistit tuhost obrobku vůči nástroji. Obrobek se vůči nástroji během obráběcího procesu nesmí pohnout a musí odolat případnému chvění. Upínací síla však nesmí obrobek nijak zdeformovat. Potřeba je také zajistit správnou polohu vzhledem k nástroji. Obrobek by měl být situován co nejbližší k vřetení stroje. Součást se upíná k pracovnímu stolu frézky pomocí speciálních šroubů s čtvercovou hlavou. Pracovní stůl je vybaven T-drážkami. Upínání může být buď **mechanické, elektromagnetické, hydraulické, pneumatické**. Druh upínání se volí v závislosti na:

- velikosti a tvaru upínaného obrobku,
- na druhu a způsobu frézování,
- na požadované přesnosti,
- na celkovém počtu obráběných kusů.

Upínají-li se větší obrobky, používají se upínací pomůcky jako upínky, podpěry, opěrky apod. K upínání menších obrobků se používají různé druhy strojních svěráků (pevné, otočné, sklopné, prizmatické apod.). Při upínání složitějších součástí se využívá speciálních frézovacích přípravků [6, 14, 16].

## 2 CHARAKTERISTIKA ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

Výběr řezného materiálu přímo souvisí s produktivitou a hospodárností obrábění. Je to jeden z nejdůležitějších parametrů při obrábění. V dnešní době stále neexistuje univerzální materiál, kterým by šlo obrábět všechny druhy materiálů. Proto je velmi důležité vybrat správný řezný materiál pro danou operaci. V blízké budoucnosti se nepředpokládá objevení zcela nového řezného materiálu, a tak se neustále vyvíjejí a optimalizují stávající materiály. Požaduje se [1, 2, 18]:

- vysoká tvrdost,
- odolnost proti opotřebení,
- tepelná vodivost,
- pevnost v ohybu,
- houževnatost.

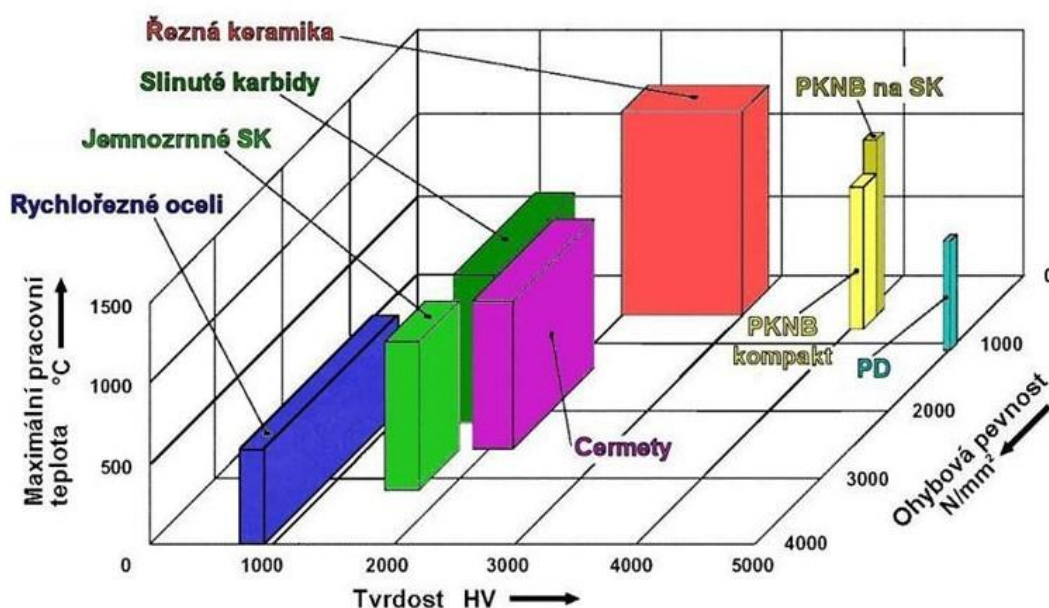
Výše uvedené vlastnosti by měl řezný materiál splňovat při vysokých teplotách po co nejdelší dobu. To souvisí i s chlazením nástroje během odebrání třísky. U procesu řezání se mechanická energie přeměňuje na teplo. Vzniklé teplo výrazně ovlivňuje vlastnosti řezného materiálu. Výběr řezného materiálu závisí především na [1, 2, 18]:

- rozměrech a tvaru obrobku,
- druhu obráběného materiálu,
- technologii výroby polotovaru,
- požadované kvalitě povrchu obrobku,
- obráběcím stroji,
- odolnosti proti opotřebení,
- druhu a tvaru řezu (řez přerušovaný, kontinuální, chlazení apod.).

### 2.1 Rozdělení řezných materiálů

Řezné nástroje jsou vyráběny s ohledem na jejich fyzikální, chemické, tepelné a mechanické vlastnosti obr. 2.1. Používané nástrojové materiály jsou následující [6]:

- nástrojové oceli (rychlořezné),
- slinuté karbidy,
- cermety,
- nástrojová řezná keramika,
- supertvrdé řezné materiály.



Obr. 2.1 Rozdělení nástrojových materiálů a jejich porovnání [18].

## 2.2 Řezné materiály pro frézování hliníkových slitin

Vzhledem k praktické části (frézování hliníkové slitiny) je výběr řezných materiálů zaměřen pouze na slinuté karbidy a polykrystalický diamant.

Největší problém u obrábění slitin hliníku tvoří tzv. **nárůstky**. Jedná se o adhezi mezi materiály. Vlivem vysokého tlaku a teploty (teplota tavení hliníku je pouze 660 °C) dochází k navařování (nalepování) třísky k nástroji (nejčastěji čelní plocha) v místě řezu. Projevuje se při nízkých řezných rychlostech. Nárůstek má vysokou tvrdost a pevnost v důsledku silného spěchování. Tvorba nárůstků je nežádoucí jev. Dochází ke změně geometrie nástroje, zhoršení kvality obrobeneho povrchu, nedodržení předepsaných tolerancí a v případě odtržení nárůstku, i ke zničení nástroje. Opatření jsou následující [19, 20]:

- zvýšení řezné rychlosti či posuvu,
- použití pozitivní geometrie (kladný úhel čela),
- nanesení povlaků ke snížení tření či mikroleštění čela nástroje diamantem,
- použití a optimalizace řezné kapaliny.

### 2.2.1 Slinuté karbidy

Vyrábějí se metodou práškové metalurgie. Slinuté karbidy (SK) jsou vlastně spěkané karbidy kovů. Obsahují karbidy wolframu (nejdůležitější), titanu, tantalu, chromu a dalších prvků. Tyto karbidy jsou během slinování (spékání) spojované kobaltem. Tepelné zpracování se u SK neprovádí, neboť tvrdost je zajištěna samotnou povahou materiálu. Teplota, při které slinuté karbidy ještě efektivně pracují je kolem 900 °C. Jejich funkce a použití závisí na složení a struktuře, a taky na množství materiálu používaného jako pojivo. Nástroj může být vyroben buďto celý ze slinutého karbidu nebo pouze jeho řezná část.

Nejběžněji se vyskytující SK je ve formě vyměnitelných břitových destiček (VBD) [1, 2, 18, 21].

### Postup výroby

Výroba slinutých karbidů je složitý proces. Obecný postup je však rozdělen do následujících operací [6, 18]:

- 1) Příprava směsi prášků – míchání, mletí, homogenizace, granulace
  - a. práškový wolfram,
  - b. práškové karbidy (WC, TiC, TaC, NbC) a kobalt.
- 2) Formování směsi – lisování, vytlačování
- 3) Předslinování (700 až 850 °C) – spojeno s operací slinování; úprava tvaru předslinutého tělesa (pokud je potřeba)
- 4) Slinování (1350 až 1650 °C) – buď v ochranné atmosféře nebo ve vakuu
- 5) Vysokoteplotní izostatické lisování – za vysokých teplot a působení tlakového plynu (zajištění rovnoměrného tlaku)
- 6) Úpravy povrchu – broušení, povlakování

### Nepovlakované slinuté karbidy

Nepovlakované slinuté karbidy tvoří jen malou část produkce. Jsou z pohledu funkce a použití děleny podle mezinárodní normy ISO 513 do šesti základních skupin **P, M, K, N, S, H**. Každá skupina se dále dělí do určitých tříd označených číslicemi (P01, P10, M60 apod.). Platí, že čím vyšší číslo, tím více obsahuje SK pojiva a je houževnatější. Třídy s označením vyššího čísla se používají pro hrubovací operace [6, 18].

#### Skupina N

Tato skupina (značená zelenou barvou) slouží pro obrábění zejména neželezných kovů s tvrdostí 30 až 130 HB jako jsou slitiny hliníku, mědi, hořčíku. Dále pak pro nekovové materiály jako jsou plasty, kompozitní materiály nebo například dřevo. Tyto nepovlakované SK se používají zejména pro dokončování slitin hliníku [1, 4].

### Povlakované slinuté karbidy

V současnosti tvoří slinuté karbidy 80-90 % veškerých břitových destiček používaných pro obráběcí nástroje. Existují dvě hlavní metody povlakování. Metoda PVD (Physical Vapour Deposition = fyzikální napařování) a CVD (Chemical Vapour Deposition = chemické napařování z plynné fáze). Mimo těchto dvou základních metod se uplatňují metody PACVD (plazmaticky aktivovaná CVD) nebo MTCVD (Middle Temperature CVD). Pro frézování hliníkových slitin se povlaky nanáší z důvodu snížení tření mezi třískou a čelem nástroje. Tím povlaky omezují nalepování třísek na čelo nástroje a vzniku nárustků. Jedná se o povlaky typu TiB<sub>2</sub>, MoS<sub>2</sub> ad. Alternativou je diamantové

mikroleštění čela. Některé druhy povlaků pro obrábění slitin hliníku jsou v tab. 2.1 [18, 22, 23].

Tab. 2.1 Vybrané druhy povlaků pro obrábění Al-slitin a jejich vlastnosti [24, 25].

Typ povlaku	Barva	Tvrдость [GPa]	Tloušťka povlaku [ $\mu\text{m}$ ]	Koeficient tření	Max. teplota použití [ $^{\circ}\text{C}$ ]
CrN	kovově stříbrná	18	1 až 7	0,3	700
ZrN	bílo zlatá	20	1 až 4	0,4	550
MoS <sub>2</sub>	černá	20	0,5 až 5	0,1	400
TiCN-MP	bronzově hnědá	32	1 až 4	0,2	400

Pozn.: MP – víceúčelový povlak

### 2.2.2 Supertvrdé řezné materiály

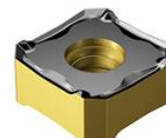
Jsou to materiály, které se používají pro speciální aplikace díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem. Patří sem **polykrystalický diamant (PKD)** a **polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB)**.

#### Polykrystalický diamant

Jedná se o nejtvrdší materiál na světě. Obrábět se smí jen materiály, které mají teplotu tavení pod 700  $^{\circ}\text{C}$  a nemají afinitu k uhlíku. Diamant se totiž při teplotě nad 650  $^{\circ}\text{C}$  mění na grafit. Některé další vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.2. Používá se pro obrábění zejména hliníkových slitin jako například bloky motorů, hlavy válců apod. Řezné rychlosti dosahují až 5000 m/min, běžně však kolem 600 m/min. Jako chlazení se používají běžné řezné kapaliny. Drsnost povrchu  $R_a$  u hliníkových slitin se pohybuje v rozsahu od 0,6 do 1,2  $\mu\text{m}$ . Těla nástrojů jsou z oceli nebo slinutých karbidů. VBD jsou osazena PKD pouze z části (jen špička – tzv. roubík) obr. 2.2, z důvodu vysoké ceny. PKD se může aplikovat i jako tenká vrstva na destičkách ze slinutých karbidů [1, 2, 18, 26].



a)



b)

Obr. 2.2 VBD [27, 28]: a) s řeznou částí z polykrystalického diamantu; b) celokarbidové s CVD povlakem.

Tab. 2.2 Vybrané vlastnosti polykrystalického diamantu [2].

Měrná hmotnost [ $\text{g/cm}^3$ ]	3,4 až 4,5
Tvrdost [HV]	5000 až 8000
Pevnost v tahu [MPa]	780 až 910
Pevnost v tlaku [GPa]	4,2 až 8,0
Pevnost v ohybu [MPa]	1200 až 1700
Měrná tepelná vodivost [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ]	120 až 550
Součinitel délkové roztažnosti $\alpha$ [ $1/10^6\cdot\text{K}$ ]	3,2 až 4,6

### 3 CHARAKTERISTIKA HLINÍKOVÝCH SLITIN

Hliník (chemická značka Al) je třetí nejrozšířenější prvek na Zemi a nejpoužívanějším neželezným kovem. Hliník v čisté formě nemá ve strojírenství, moc velké využití. Daleko více se uplatňuje ve formě slitin s jinými kovy. Slitiny hliníku se využívají pro své technologické, fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti. Široké spektrum vlastností se uplatňuje s ohledem na použití [30].

Hliník se nachází v přírodě v podobě minerálů jako například nejznámější korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dále pak diaspor, boehmit, spinel a další. Dnes se pro výrobu hliníku nejvíce používá hornina zvaná **bauxit** [30].

Výroba hliníku je prováděna elektrolýzou či moderními trendy ve vývoji technologií, jako je karbotermická redukce. Čistý hliník je vyráběn z oxidu hlinitého. Oxid hlinitý se získává pomocí různých metod (Bayerova metoda, spékací metoda) [30].

#### 3.1 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Slitiny hliníku se hojně využívají díky výborným vlastnostem, kterými disponují. Kombinací fyzikálních, mechanických, chemických a technologických vlastností, umožňují aplikaci téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Největší předností je však nízká měrná hmotnost při zachování poměrně dobré pevnosti a tvrdosti. To se využívá hlavně v leteckém a automobilovém průmyslu [29].

##### 3.1.1 Fyzikální vlastnosti hliníku

Pro konstrukční účely je důležitá fyzikální vlastnost teplotní roztažnost (tab. 3.2). Další vybrané fyzikální vlastnosti jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Hodnoty vybraných fyzikálních vlastností [30].

Vlastnosti	Hodnoty
Atomová hmotnost	26,98154
Mřížka	K12 (kubická plošně centrovaná)
Parametr mřížky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$\rho = 2,6989 \text{ g/cm}^3$ (při 20 °C)
Teplota tavení	660,4 °C
Měrná tepelná kapacita	$C = 880 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ (při 20 °C)
Tepelná vodivost	247 W/m (při 25 °C)
Latentní teplo tavení	397 kJ/kg



Tab. 3.2 Hodnoty teplotní roztažnosti [30].

Interval teploty [°C]	Průměrný koeficient tepelné roztažnosti [ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]
-150 až 20	19,9
-50 až 20	21,8
20 až 100	23,6
20 až 200	24,5
20 až 300	25,5
20 až 400	26,4
20 až 500	27,4

### 3.2 Rozdělení a označování slitin hliníku a jejich charakteristika

Pro zvýšení mechanických vlastností se přidávají do hliníku přísady některých prvků. Pro zlepšení mechanických vlastností stačí pouze malé množství těchto prvků. Hlavními přísadami jsou měď, zinek, křemík, hořčík, mangan a nikl. Tyto prvky dávají slitině specifické vlastnosti k použití. Mnohé slitiny lze vytvářet. Rozdělení slitin hliníku může být široké. Dělí se podle kritéria, které je zrovna potřeba. Základní tři skupiny slitin hliníku jsou [31]:

- slévárenské slitiny,
- slitiny k tváření,
- automatové slitiny (k obrábění).

Další dělení slévárenských slitin je podle prvku, který je hlavní přísadový [29]:

- slitiny Al-Si – siluminy,
- slitiny Al-Cu – duraluminium,
- slitiny Al-Mg – hydronalium.

Hliníkové slitiny určené k tváření se mohou dále rozdělit podle tepelného zpracování na **vytvrditelné** a **nevytvrditelné**.

#### 3.2.1 Slévárenské slitiny hliníku

Tyto slitiny se odlívají do písku, kovových forem, či pod tlakem. Tvářené výrobky dosahují lepších mechanických vlastností než odlitky. Maximální pevnost odlitků bývá kolem 250 MPa. U většiny slitin určených ke slévání je hlavním přísadovým prvkem křemík, od toho název siluminy. Slitiny hliníku lze odlévat i pod tlakem, čehož se stále více využívá.

V současnosti lze slévárenské slitiny hliníku dělit na hlavní druhy, které najdeme v tab. 3.3 [37].

Tab. 3.3 Přehled slévárenských slitin a jejich vlastností [37].

<b>Slitina typu Al – Cu</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– obsah Cu v rozmezí 4 – 5 %,</li> <li>– tepelným zpracováním lze zvýšit pevnost,</li> <li>– nevýhodou je horší slévatelnost a nízká korozní odolnost,</li> </ul>
<b>Slitina typu Al – Cu – Si</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zlepšení slévárenských vlastností (díky křemíku),</li> <li>– obsah Si až 22 % (vysoká odolnost proti otěru),</li> <li>– Cu nad 3 % → lze tepelně zpracovat,</li> </ul>
<b>Slitina typu Al – Si</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– obsah Si většinou mezi 5 až 13 %,</li> <li>– dobrá slévatelnost,</li> <li>– dělení na podeutektické (méně než 12 % Si), eutektické (kolem 12 % Si) a nadeutektické (nad 12 % Si),</li> </ul>
<b>Slitina typu Al – Mg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– velmi dobrá odolnost vůči korozi, především v mořské vodě,</li> <li>– dobře obrobitelné i svařitelné,</li> <li>– špatná slévatelnost,</li> </ul>
<b>Slitina typu Al – Zn – Mg</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– dobré pevnostní vlastnosti již v litém stavu,</li> <li>– dobrá odolnost vůči korozi,</li> <li>– špatná slévatelnost,</li> </ul>
<b>Slitina typu Al – Sn</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– obsah Sn cca 6 % s malým množstvím Cu a Ni,</li> <li>– pro výrobu kluzných ložisek.</li> </ul>

#### Označování slitin hliníku na odlitky podle ČSN EN 1706 – číselné značení [31].

Označuje se písmeny EN AC a pěti číslicemi. Například slitina EN AC-21000. Jednotlivé díly v označení znamenají:

- EN následovaná mezerou,
- A určuje hliník,
- C určuje odlitky,

- spojovací čárka,
- čtyři číslice značící chemické složení.

Skupina slitin se určuje dle první číslice. Rozčlenění je v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Přiřazení druhu slitiny k řadě [31].

Řada (rozhoduje první číslice)	Druh slitiny
10000	Al 99,00 % a více
20000	AlCu
30000	AlMn
40000	AlSi
50000	AlMg
60000	AlMgSi
70000	AlZn
80000	Al s různými prvky

### 3.2.2 Hliníkové slitiny určené pro tváření

U těchto slitin lze měnit a přizpůsobovat vlastnosti přesným chemickým složením, technologickými parametry tváření a tepelným zpracováním. Vyžaduje se samozřejmě dobrá tvářitelnost za tepla i za studena. Podle možnosti aplikace tepelného zpracování – vytvrzováním, se slitiny pro tváření dělí na **slitiny tepelně nezpracovatelné** a **slitiny tepelně zpracovatelné**. Dále lze slitiny pro tváření rozdělit na dvě větší skupiny, a to na [29, 34]:

#### I. Slitiny s vysokými mechanickými vlastnostmi, ale s omezenou odolností proti korozi

Do této kategorie patří slitina typu **Al – Cu – Mg** taky známá jako duraluminium (dural). Slitina se musí vytvrdit, aby dosahovala optimálních vlastností. Jsou použitelné do 150 °C. Používá se zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. Další je slitina **Al – Cu – Ni**. Díky niklu si tato slitina zachovává dobré mechanické vlastnosti i za vyšších teplot. Používá se například pro písty spalovacích motorů. Slitina **Al – Zn – Mg**. Tepelně se zpracovává pro lepší mechanické vlastnosti. Nejpevnější slitiny tohoto typu dosahují meze pevnosti  $R_m$  až 600 MPa.

## II. Slitiny se středními mechanickými vlastnostmi, ale s dobrou odolností vůči korozi

Skupina **Al – Mg** je asi nejdůležitější jednoduchá slitina. Do 2 % hořčíku mají velmi dobrou tvárnost za studena. Vyšší procento křemíku snižuje tvárnost, ale stoupá tvrdost a pevnost. Pro lepší mechanické vlastnosti se tváří za studena bez tepelného zpracování. Skupiny **Al – Mg 5**, **Al – Mg 7** případně 9 % obsahu hořčíku jsou nejčastější a nejběžnější slitiny. Vynikají velmi dobrou odolností proti korozi, a to i proti mořské vodě a jiným agresivním látkám. Využití nalézají v potravinářském, chemickém a lodním průmyslu. Slitina **Al – Mg – Si**. Je mírně vytvrditelná. Ve srovnání s durallem dosahuje nižších mechanických vlastností, avšak daleko vyšší houževnatosti a odolnosti proti korozi. Skupina **Al – Mn**. Obsah manganu zvyšuje pevnost a je většinou do 1,5 %. Slouží pro výrobu nádrží v chemickém průmyslu.

### Označování slitin hliníku pro tváření podle ČSN EN 573-1 až 3 – číselné značení [31].

Označování slitin pro tváření je podobné jako u slitin hliníku pro odlitky. Označuje se písmeny EN AW a čtyřmi číslicemi. Například slitina EN AW-5052. Jednotlivé díly v označení jsou v pořadí:

- EN následovaná mezerou,
- A určuje hliník,
- W určuje tvářené výrobky,
- spojovací čárka,
- čtyři číslice značící chemické složení.

Skupina slitin se určuje dle první číslice. Rozčlenění je v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Přiřazení druhu slitiny k řadě [31].

Řada (rozhoduje první číslice)	Druh slitiny
1000	Al 99,00 % a více
2000	AlCu
3000	AlMn
4000	AlSi
5000	AlMg
6000	AlMgSi
7000	AlZn
8000	Al s různými prvky

### 3.2.3 Automatové slitiny

Jedná se o speciální slitiny pro obrábění. Mezi nejznámější obrobitelné slitiny patří AlCu6BiPb, AlMgSiPb a AlCu4PbMg. Díky obsahu olova (0,5 až 1,5 %) vzniká při obrábění drobná tříška, což je žádané. Ovšem olovo je zdraví škodlivé. Proto se obsah olova podle současné legislativy silně potlačuje. Náhrada za slitinu AlCu6BiPb je AlCuSnBi pod názvem Stanal 37 a za slitinu AlMgSiPb je náhrada AlMgSiSnBi pod názvem Stanal 32 [33].

### 3.3 Tepelné zpracování slitin hliníku

Tepelné zpracování (TZ) se provádí s cílem dosažení požadované struktury a vlastností. Tepelné zpracování slitin pro odlévání a pro tváření je stejné. Obvykle se provádí tyto druhy TZ [30]:

- žihání,
- vytvrzování.

#### 3.3.1 Žihání slitin hliníku

Existují různé způsoby žihání. Každé za jiným účelem. Způsoby žihání jsou charakterizovány v tab. 3.6.

Tab. 3.6 Druhy žihání slitin hliníku a jejich charakteristika [31, 34].

Druh žihání	Charakteristika žihání
Rekrystalizační žihání	<ul style="list-style-type: none"> <li>– teploty 250 až 500 °C (obvykle 350 °C)</li> <li>– použití u slitiny tvářené za studena</li> <li>– přeměna zdeformované struktury na novou (rekrystalizační)</li> <li>– odstranění zpevnění po předchozím tváření</li> <li>– snížení pevnosti, zvýšení plasticity</li> </ul>
Stabilizační žihání	<ul style="list-style-type: none"> <li>– teploty 240 až 350 °C</li> <li>– stabilizace struktury a daných vlastností</li> <li>– pro součásti pracující za vyšších teplot</li> <li>– nejčastěji u odlitků</li> </ul>
Žihání ke snížení napětí	<ul style="list-style-type: none"> <li>– teplota 200 až 400 °C</li> <li>– řízené ochlazování do 200 °C</li> <li>– použití u tvarově složitých odlitků, svařenců</li> </ul>

## Homogenizační žíhání

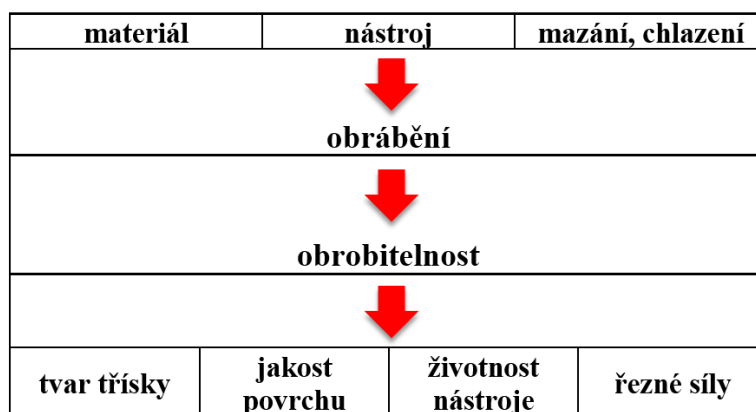
- teplota blízká teplotě solidu (křivka změny rozpustnosti)
- pro snížení chemické heterogenity materiálu

### 3.3.2 Vytvrzování slitin hliníku

U precipitačního vytvrzování (stárnutí) je základem rozpad přesyceného tuhého roztoku. Skládá se z rozpouštěcího ohřevu, rychlého ochlazení a vytvrzování. Rozpouštěcí ohřev nebo též rozpouštěcí žíhání probíhá za teploty mezi křivkou změny rozpustnosti a solidem. Následuje rychlé ochlazení z důvodu potlačení vylučování rovnovážných fází. Vzniká přesycený tuhý roztok. K přirozenému stárnutí dochází za teploty okolí. K umělému stárnutí dochází za zvýšené teploty. Celý tento proces značně ovlivňuje mechanické, fyzikální a technologické vlastnosti materiálu [31, 34].

### 3.4 Obrobitelnost hliníkových slitin

Obrobitelnost hliníkových slitin je ovlivněna řadou parametrů a vlastností. Záleží na fyzikálních, mechanických a chemických vlastnostech obrobku i nástroje. V neposlední řadě na tepelném zpracování slitiny, zvolení řezných podmínek, chlazení či mazání i na technických parametrech stroje (obr. 3.1). Všeobecně lze hliníkové slitiny považovat za problematické co se týče obrábění z důvodu nízké teploty tání a vysoké tepelné vodivosti. Avšak pokud se obrábí ocel a slitina hliníku stejné pevnosti, řezné síly u hliníkové slitiny jsou daleko menší. Další velmi důležité kritérium je tvorba třísky a s tím související tvorba nárůstků viz kapitola 2.1 [31].



Obr. 3.1 Parametry popisující obrobitelnost [31].

U obrábění slévarenských slitin nejvíce záleží na obsahu křemíku. Čím vyšší obsah křemíku ve slitině je, tím je opotřebení nástroje větší. Větší opotřebení nástroje se projeví i u přítomnosti nekovových vměstků či oxidických vrstev. Naopak opotřebení nástroje snižuje jemnozrnná lící struktura. Obecně se používají nižší řezné rychlosti i posuvy. U podeutektických a eutektických Al-Si slitin drsnost povrchu klesá s rostoucí řeznou

rychlostí. Ovšem jakost povrchu se opětovně zhoršuje od určité, relativně velké, řezné rychlosti [31].

Tvářené slitiny se obrábí poměrně dobře. Obrobitelnost se zlepšuje tvářením za studena. U slitin vytvrzených je tříska často dlouhá a stočená, tudíž přijatelná. U nevytvrděných slitin je tříska dlouhá a spojitá, což je nežádoucí. Jakost povrchu je výborná [31].

Automatové oceli jsou legovány prvky s nízkou teplotou tání jako olovo, bismut, cín, antimon či kadmium. Tyto prvky tvoří nízkotavitelné fáze, které se v místě řezu natavují vlivem vysoké teploty. Tím snižují tření mezi odcházející třískou a čelem nástroje. Je tak omezena tvorba nárůstků [31].

### 3.4.1 Třída obrobitelnosti

Relativní obrobitelnost materiálu se vztahuje k etalonovému materiálu příslušné skupiny. Dle ČSN 10-0-I/II se materiály rozdělují do devíti skupin značenými malými písmeny. Tyto skupiny se dále dělí do dvaceti tříd obrobitelnosti. Třídy jsou vztahovány k součiniteli obrobitelnosti  $K_v$ . Součinitel obrobitelnosti je poměr mezi řeznou rychlostí při trvanlivosti  $T$ , pro opotřebení hřbetu  $VB$ , zkoušeného a etanolového materiálu. Hliníkové slitiny jsou značeny malým písmenem **d** (lehké neželezné kovy a jejich slitiny). Etalonový materiál pro slitiny hliníku je ČSN 42 4380.11 o tvrdosti 100 HB. S rostoucím číslem třídy obrobitelnosti se zlepšuje obrobitelnost [2].

Tab. 3.7 Přiřazení hodnot součinitele obrobitelnosti k dané třídě obrobitelnosti [2].

Součinitel obrobitelnosti $K_v$		Třída obrobitelnosti pro skupinu hliníku
od – do	střední hodnota	d
0,36 - 0,44	0,40	6 d
0,45 - 0,56	0,50	7 d
0,57 - 0,71	0,63	8 d
0,72 - 0,89	0,80	9 d
0,9 - 1,12	1,0	10 d
1,13 - 1,41	1,26	11 d
1,42 - 1,78	1,59	12 d
1,79 - 2,24	2,0	13 d

Pozn.: modře je zvýrazněný etalonový materiál

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této práce je zaměřena na vliv řezných podmínek na výslednou jakost povrchu s ohledem na strojní čas.

### 4.1 Obráběný materiál

Pro tento experiment byla zvolena slitina hliníku určená pro tváření s vyšší pevností, avšak nízkou odolností proti korozi s označením dle ČSN jako 42 4203 ve vytvrzeném stavu. Označení dle EN AW je 2024 a chemické označení AlCu4Mg1 (dural). Tyto duralové slitiny se využívají tam, kde je potřeba nízká měrná hmotnost při zachování dostatečné pevnosti, například v leteckém průmyslu. Korozní odolnost je ovšem zhoršena. Konstrukční využitelnost v zatíženém stavu je asi do 150 °C. Technologické a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tab. 4.1 [36, 37].

Tab.4.1 Mechanické a technologické vlastnosti slitiny AlCu4Mg1 dle [36].

Označení dle EN AW	2024
Stav materiálu	T3, T4
Pevnost v tahu $R_m$ [MPa]	min. 400
Mez kluzu min. $R_p$ [MPa]	310
Tažnost A min. [%]	8
Tvrдость [HBW]	120
Vhodnost k eloxování	špatná
Korozní odolnost	nízká
Svařitelnost	podmíněná
Obrobitelnost	velmi dobrá

Pozn.: 1. Uvedené hodnoty jsou orientační.

2. Eloxování neboli elektrolytická oxidace kovu, je povrchová úprava sloužící ke zlepšení odolnosti proti korozi či pro zlepšení mechanických vlastností povrchové vrstvy [38].

Stav T3 je po rozpouštěcím žihání, tváření za studena a přirozeném stárnutí k dosažení dostatečně stabilního stavu. Stav T4 je po rozpouštěcím žihání a přirozeném stárnutí k dosažení dostatečně stabilního stavu [36].



Chemické složení daného materiálu je v tab. 4.2 a je pouze orientační. Hodnoty v tabulce jsou brány jako maximální povolené, pokud není dán rozsah.

Tab.4.2 Typické chemické složení obráběného materiálu [36].

Chemické složení [hm. %]					
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
0,50	0,50	3,80 ÷ 4,90	0,30 ÷ 0,90	1,20 ÷ 1,80	0,30

#### 4.2 Obráběcí nástroj

Obráběcí nástroj byl zvolen vzhledem k obráběnému materiálu. Jedná se o stopkovou frézu válcovou čelní, monolitní obr. 4.1. Jmenovitý průměr frézy je 10 mm. Fréza je vyrobena ze slinutého karbidu a je bez povlaku. Fréza je dle výrobce ZPS – FRÉZOVACÍ NÁSTROJE vhodná pro frézování neželezných kovů do 250 MPa a pro slitiny hliníku do 530 MPa. Další vybrané vlastnosti jsou v tab. 4.3 [39].

Tab.4.3 Vybrané vlastnosti zvolené frézy [39].

Geometrie	úhel šroubovice	38°
	úhel čela	+15°
Povlak	bez povlaku	
Materiál	K30	
Norma	podniková (ZPS-FN)	
Počet zubů	4	
Upínací prvek	válcová stopka s ploškou (Weldon) dle DIN 6535 HB	



Obr. 4.1 Fréza použitá pro experiment [39].

Upínání zvolené frézy je možné více způsoby, navíc i kvůli upínací plošce Weldon. Upnutí bylo pomocí kombinace hydraulického upínače s kleštinou obr. 4.2, kvůli dostupnosti pro daný průměr frézy a vysoké tuhosti upnutí.



Obr. 4.2 Nástroj upnutý v hydraulickém upínači.

### 4.3 Obráběcí stroj

Pro experiment bylo zvoleno pětiosé portálové obráběcí centrum MCV 1210 od firmy TAJMAC – ZPS (obr. 4.3 a 4.4). Toto obráběcí centrum je vhodné k obrábění zejména složitých prostorových tvarů. Pro daný experiment byl stroj zbytečně předimenzovaný. Stroj byl zvolen z důvodu potřeby vysokých otáček (max. 18 000 1/min), neboť slitiny hliníku se obrábí vyššími řeznými rychlostmi (okolo 500 m/min., u vysokorychlostního frézování HSM se otáčky pohybují od 15 000 do 50 000 1/min). Nejvyšší zvolená řezná rychlost u experimentu byla 400 m/min. Ostatní dostupné stroje nesplňovali požadavek na tuto řeznou rychlost.

Druhé nejvyšší možné otáčky na stroji byly pouze 6 000 1/min, což je nedostačující. Technické data zvoleného stroje jsou zpracovány v tab. 4.4 [40, 41].



Obr. 4.3 Portálové obráběcí centrum MCV 1210.



Obr. 4.4 Portálové obráběcí centrum MCV 1210 [40].

Tab. 4.4 Technické parametry stroje [40].

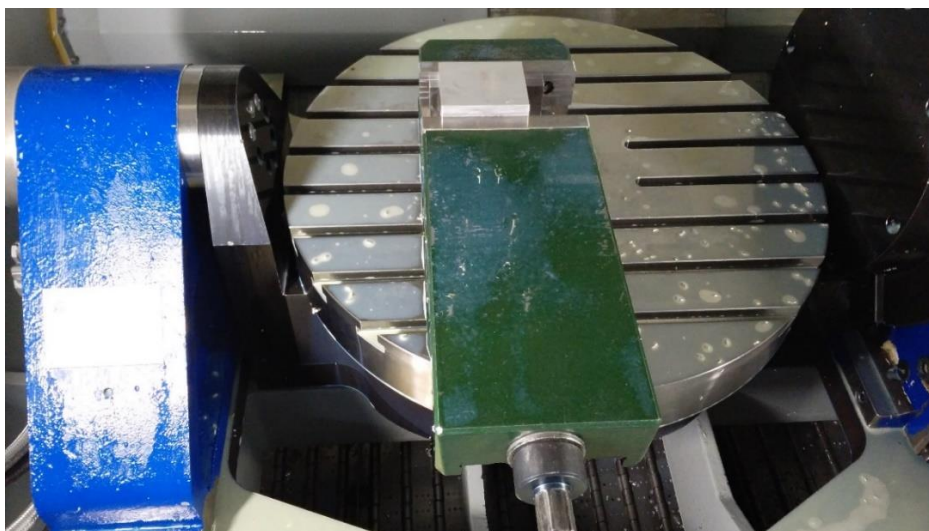
Pracovní pojezdy		
Osa X (křížový suport)		1 000 mm
Osa Y (příčník)		800 mm
Osa Z (smykadlo)		600 mm
Pracovní stůl		
Rozměr pracovního stolu		1 200 x 1 000 mm
Maximální zatížení		3 000 kg
Vřeteno		
Typ		elektrovřeteno Weiss 176 024_800
Rozsah otáček		0 – 18 000 1/min
Upínací kužel		HSK-A 63
Maximální krouticí moment		197 Nm
Přesnost		
Přesnost polohování v ose X, Y, Z		0,008 mm
Opakovací přesnost v ose X, Y Z		0,006 mm
Nástrojový držák		DIN 69 893 – HSK-A 63
Automatický zásobník nástrojů		
Počet nástrojů v zásobníku		30
Max. průměr nástroje	při obsazených sousedních místech v zásobníku	80 mm
	při neobsazených sousedních místech v zásobníku	115 mm
Maximální délka nástroje		250 mm
Maximální hmotnost včetně držáku		6,5 kg
Řídicí systém		SINUMERIC 840D (SIEMENS)
Požadavky na elektrickou energii		
Připojovací napětí		3 x 400 V/50 Hz
Příkon pracovní		45 kVA
Proud při plném zatížení stroje		125 A

#### 4.4 Průběh experimentu

Obrobkem byly dva stejné duralové kvádry o přibližných rozměrech 83 x 70 x 23 mm (délka x šířka x výška), které byly upnuty do strojního svěráku (obr. 4.5). Svěrák byl upnut do T-drážek k pracovnímu stolu stroje pomocí šroubů.

Experiment probíhal na čtyři etapy (fáze). V každé etapě bylo projeto pět průjezdů (drážek) v celé délce obrobku. U každé drážky byla jiná hodnota posuvu na zub  $f_z$ , avšak řezná rychlost  $v_c$  byla během jedné fáze konstantní. Řezná rychlost byla měněna s každou etapou, ale posuvy na zub byly stejné u všech fází. Po spuštění programu následovalo frézování první fáze. Po jejím skončení se program pozastavil, obrodek byl otočen a program se opět spustil. Při skončení druhé etapy byl program opět pozastaven, obrodek byl vyměněn za nový a pokračovalo se až do skončení čtvrté části. Šířka záběru ostří  $a_p$  byla 2 mm.

V průběhu frézování byla použita procesní kapalina (obr. 4.6). Konkrétně směs koncentráту procesní kapaliny CIMSTAR 597 a vody v poměru 5:100.



Obr. 4.5 Obrodek upnutý ve svěráku.

Jelikož výrobce nástroje neudává doporučené řezné podmínky pro danou frézu, byly řezné podmínky zvoleny s ohledem na stroj, nástroj a materiál obrobku. Po konzultaci s vedoucím práce byly zvoleny hodnoty, které jsou uvedeny v tab. 4.5 a 4.6.

Tab. 4.5 Řezné rychlosti v jednotlivých etapách.

	Etapa			
	1	2	3	4
Řezná rychlost $v_c$ [m/min]	200	300	400	100

Jako první byla zvolena řezná rychlost  $v_c = 200$  m/min. Po následném zkoumání řezného procesu při této řezné rychlosti, byly zvoleny další hodnoty. Posuvy na zub byly voleny v rozpětí, které umožňovalo simulovat nejčastěji volené hodnoty této veličiny.

Tab. 4.6 Posuv na zub u jednotlivých průjezdů.

	Průjezd (drážka)				
	1	2	3	4	5
<b>Posuv na zub <math>f_z</math> [mm]</b>	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15



Obr.4.6 Průběh experimentu.

Po ukončení fáze frézování byl obrobek očištěn a vysušen od procesní kapaliny a případných nečistot. Poté bylo uskutečněno vlastní měření drsnosti povrchu. Drsnost povrchu je nejvýznamnější kritérium při zkoumání integrity povrchu. Integrity povrchu zahrnuje podmínky jako jsou jakost povrchu, nepřítomnost trhlin, tepelná poškození nebo zbytková tahová napětí. Na frézovaném obrobku byly měřeny parametry profilu ve 2D, tzv. R-parametry, konkrétně hodnoty  $R_a$  (průměrná aritmetická úchylka měřeného profilu) a  $R_z$  (největší výška profilu). Průměrná aritmetická úchylka měřeného profilu je aritmetický



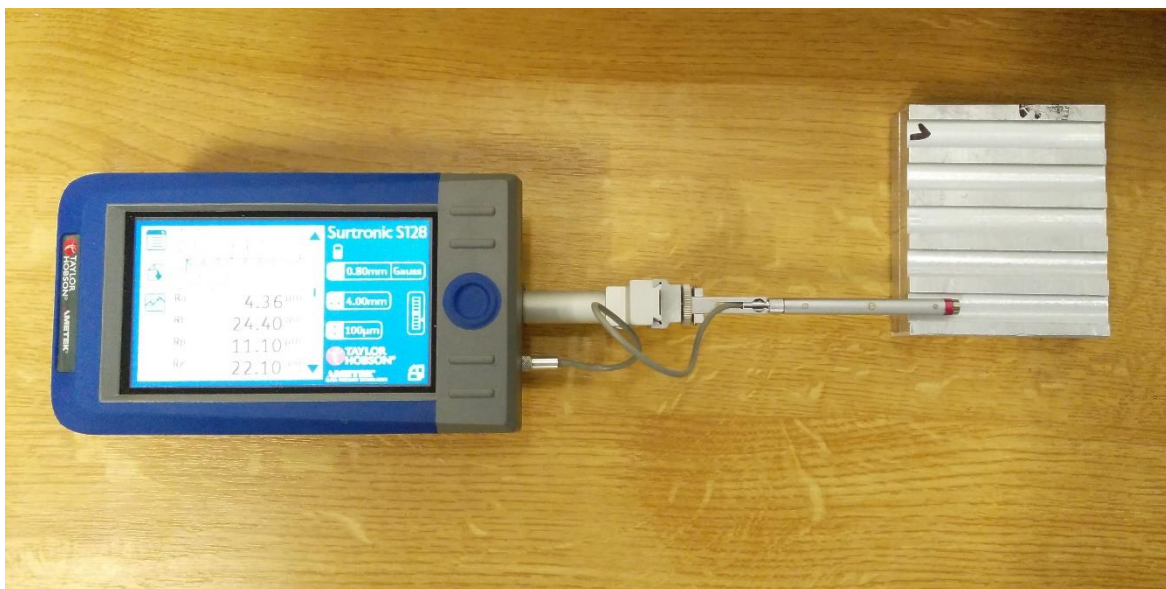
průměr absolutních hodnot souřadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky. Běžně dosahované hodnoty  $R_a$  pro frézování jsou v tab. 4.7 [42, 43].

Tab.4.7 Dosahované hodnoty parametru  $R_a$  a stupně přesnosti IT pro technologii frézování dle [42].

	Hrubování	Obrábění na čisto	Jemné obrábění
Hodnota $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,3 – 25	1,6 – 6,3	0,8 – 1,6
Stupeň přesnosti IT	10 – 13	7 – 13	7 – 8

Metoda měření drsnosti povrchu byla zvolena dotyková. Přístroj, kterým bylo prováděno měření je drsnoměr Surtronic S128 (obr. 4.7). Jedná se o přístroj pro univerzální dílenské měření. Technické parametry přístroje viz příloha č. 2.

Při následném vyhodnocování výsledků byla zvolena limitní hodnota  $R_a$ , neboť parametr  $R_a$  je často uváděn na výkresech. Limitní hodnota byla zvolena na  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ , jelikož se jedná o nejběžněji volenou hodnotu.



Obr. 4.7 Měření s drsnoměrem Surtronic S128.

## 5 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

V této části bakalářské práce jsou vyhodnoceny výsledky experimentu. Výsledkem je zkoumání jakosti povrchu, při různých řezných podmínkách s ohledem na strojní časy.

### 5.1 Vyhodnocení drsnosti povrchu při frézování různými řeznými podmínkami

Měření drsnosti povrchu bylo prováděno ve třech místech obrobené drážky, kvůli vyšší přesnosti měření a kvůli snížení případných chyb měření. Z těchto tří naměřených hodnot byl následně vypočten aritmetický průměr hodnot  $R_a$  a  $R_z$ . Výsledné hodnoty drsnosti povrchu pro jednotlivé řezné rychlosti a posuvy jsou v tab. 5.1 a 5.2.

Pozn.: Zeleně jsou označeny nejlepší naměřené hodnoty, červeně nejhorší.

Tab. 5.1 Průměrné hodnoty  $R_a$  v  $\mu\text{m}$  pro zvolené řezné podmínky.

Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm]				
	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15
200	1,53	2,21	2,12	2,39	2,35
300	1,49	2,14	3,12	3,29	3,51
400	1,96	3,01	4,44	4,32	4,6
100	1,65	2,52	3,11	4,47	4,50

Tab. 5.2 Průměrné hodnoty  $R_z$  v  $\mu\text{m}$  pro zvolené řezné podmínky.

Řezná rychlost [m/min]	Posuv na zub [mm]				
	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15
200	8,43	10,87	11,37	13,03	12,7
300	9,17	12,33	15,57	17,1	18,77
400	11,73	17,13	22,53	21,73	23,37
100	8,6	12,5	16,7	22,67	22,77

Jak je vidět v tabulkách 5.1 a 5.2, nejvyšší hodnoty drsnosti povrchu bylo dosaženo při nejvyšší zvolené řezné rychlosti  $v_c = 400$  m/min v kombinaci s největší hodnotou posuvu na zub  $f_z = 0,15$  mm. Naopak nejnižší hodnota drsnosti povrchu byla dosažena při nejnižší zvolené hodnotě posuvu na zub  $f_z = 0,03$  mm, avšak hodnoty řezné rychlosti jsou u parametrů  $R_a$  a  $R_z$  rozdílné. V tabulkách je dále možné vidět jasný postupný růst hodnot drsnosti povrchu s rostoucím posuvem na zub.



Dále byla zpracována v tab. 5.3 až 5.6 drsnost povrchu s ohledem na strojní čas daného průjezdu. Tyto výsledky nám ukazují, zda se vyplatí použít vyšší řezné rychlosti, při dodržení nastavené limitní hodnoty  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ . Ovšem tento ukazatel záleží na podmínkách, které by zákazník požadoval.

Strojní časy byly vypočteny bez náběhů a přeběhů dle vzorce 5.1. Náběhy a přeběhy byly u každého průjezdu stejné a neuvažují se ve výpočtech kvůli jejím vysokým hodnotám. Vysoké náběhy a přeběhy byly zvoleny na základě doporučení operátora stroje kvůli bezpečnosti.

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} [\text{min}] \quad (5.1)$$

Pozn.: jednotka strojního času u frézování se udává v minutách, ovšem v tabulkách je použita jednotka sekunda, kvůli velmi malým výsledným hodnotám této veličiny.

Tab. 5.3 Hodnoty strojních časů a drsnosti povrchu při řezné rychlosti 200 m/min.

	Průjezd				
	1 ( $f_z = 0,03 \text{ mm}$ )	2 ( $f_z = 0,06 \text{ mm}$ )	3 ( $f_z = 0,09 \text{ mm}$ )	4 ( $f_z = 0,12 \text{ mm}$ )	5 ( $f_z = 0,15 \text{ mm}$ )
Strojní čas [s]	5,50	2,76	1,83	1,37	1,10
$R_a [\mu\text{m}]$	1,53	2,21	2,12	2,39	2,35

Tab. 5.4 Hodnoty strojních časů a drsnosti povrchu při řezné rychlosti 300 m/min.

	Průjezd				
	1 ( $f_z = 0,03 \text{ mm}$ )	2 ( $f_z = 0,06 \text{ mm}$ )	3 ( $f_z = 0,09 \text{ mm}$ )	4 ( $f_z = 0,12 \text{ mm}$ )	5 ( $f_z = 0,15 \text{ mm}$ )
Strojní čas [s]	3,66	1,83	1,22	0,92	0,73
$R_a [\mu\text{m}]$	1,49	2,14	3,12	3,29	3,51

Tab. 5.5 Hodnoty strojních časů a drsnosti povrchu při řezné rychlosti 400 m/min.

	Průjezd				
	1 ( $f_z = 0,03 \text{ mm}$ )	2 ( $f_z = 0,06 \text{ mm}$ )	3 ( $f_z = 0,09 \text{ mm}$ )	4 ( $f_z = 0,12 \text{ mm}$ )	5 ( $f_z = 0,15 \text{ mm}$ )
Strojní čas [s]	2,75	1,37	0,92	0,69	0,55
$R_a [\mu\text{m}]$	1,96	3,01	4,44	4,32	4,6

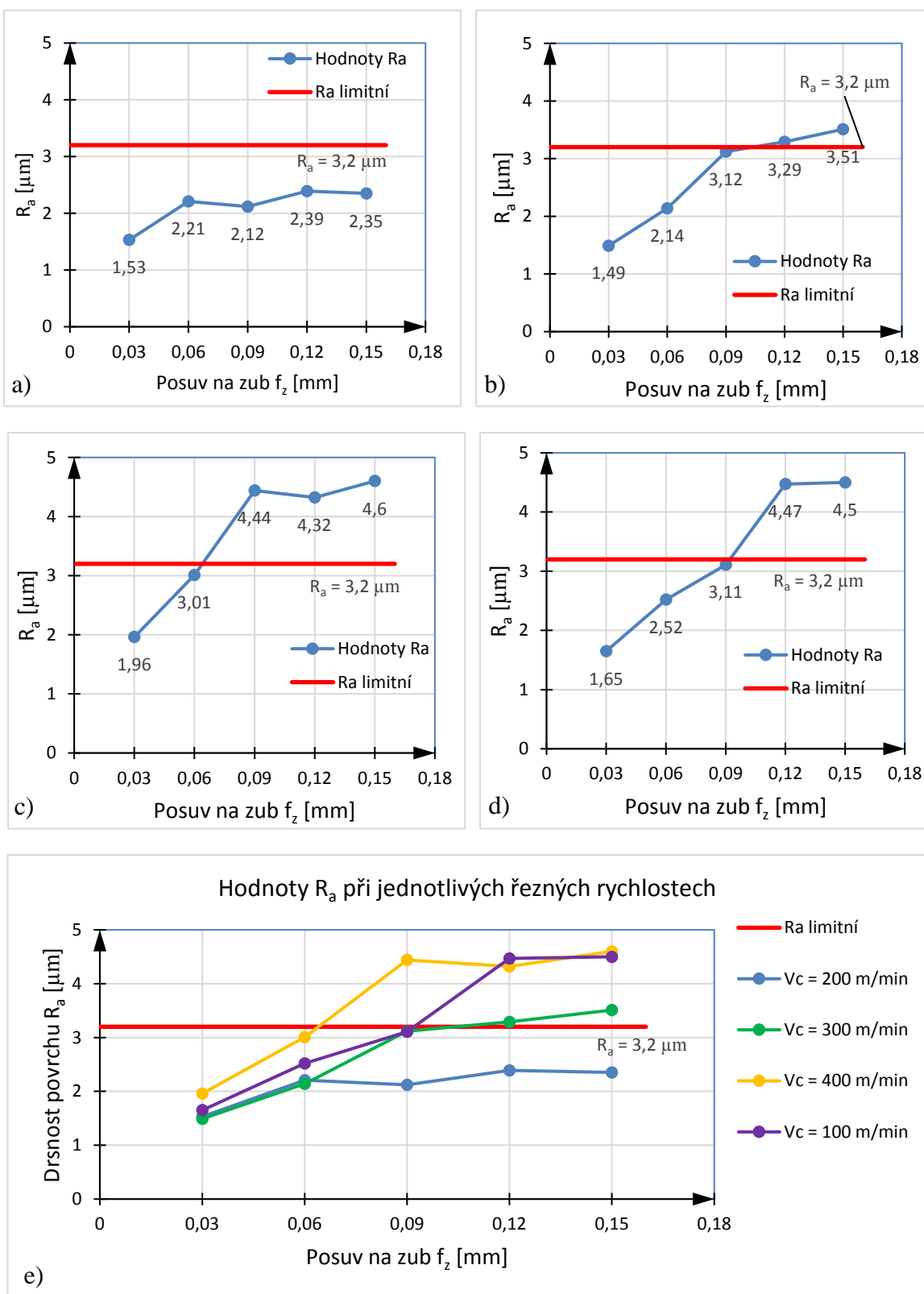
Tab. 5.6 Hodnoty strojních časů a drsnosti povrchu při řezné rychlosti 100 m/min.

	Průjezd				
	1 ( $f_z = 0,03$ mm)	2 ( $f_z = 0,06$ mm)	3 ( $f_z = 0,09$ mm)	4 ( $f_z = 0,12$ mm)	5 ( $f_z = 0,15$ mm)
Strojní čas [s]	11	5,50	3,67	2,75	2,20
$R_a$ [ $\mu$ m]	1,65	2,52	3,11	4,47	4,50

Na obr. 5.1 lze vidět grafy které znázorňují dodržení či nedodržení zvolené limitní hodnoty  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$  při jednotlivých řezných rychlostech a posuvech na zub. Z grafu 5.1 a) je patrné, že při řezné rychlosti  $v_c = 200$  m/min a jakémkoliv posuvu na zub, byla podmínka splněna.

Za nejlepší výsledek experimentu s ohledem na strojní čas, je považována hodnota parametru  $R_a = 2,35 \mu\text{m}$  při řezné rychlosti  $v_c = 200$  m/min a posuvu na zub  $f_z = 0,15$  mm. Strojní čas frézování této drážky byl  $t_{AS} = 1,1$  s. Kvalitnějšího povrchu dosáhnout lze, avšak na úkor strojního času.

Jako nejlepší řeznou rychlost lze považovat první zvolenou, tedy  $v_c = 200$  m/min, protože u této řezné rychlosti bylo splněno kritérium drsnosti povrchu  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$  u všech posuvů na zub.

Obr. 5.1 Drsnost povrchu  $R_a$  při jednotlivých posuvech na zub  $f_z$  a při řezných rychlostech:a)  $v_c = 200$  m/min; b)  $v_c = 300$  m/min; c)  $v_c = 400$  m/min; d)  $v_c = 100$  m/min;

e) přehled jednotlivých úseků.

## ZÁVĚR

Teoretická část této kvalifikační práce je zaměřena na charakteristiku technologie frézování, materiálů pro řezné nástroje, a to s ohledem na obrábění hliníkových slitin. Hliníkové slitiny jsou zde také charakterizovány. Druhá část této práce je experimentální.

Experiment je zaměřen na vliv řezných podmínek na výslednou jakost povrchu s ohledem na strojní čas. Byl frézován hliníkový obrobek různými řeznými rychlostmi a různými posuvy na zub, přičemž byla zkoumána jakost povrchu a byly spočteny strojní časy. Použitým nástrojem byla čelní válcová stopková fréza ze slinutého karbidu bez povlaku. Fréza má čtyři břity a je monolitní. Výrobce je doporučena pro frézování slitin neželezných kovů, a zvláště pak slitin hliníku. Použitým strojem bylo portálové obráběcí centrum MCV 1210. Stroj je umístěn v areálu fakulty. Jako obráběný materiál byla zvolena slitina hliníku dle ČSN 42 4203 ve vytvrzeném stavu (dural). Během experimentu byla použita procesní kapalina CIMSTAR 597 ředěná vodou v poměru 5:100.

Závěry vyvozené z experimentální části jsou následující:

- pro řeznou rychlost  $v_c = 200$  m/min s ohledem na strojní čas, byla hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 2,35$   $\mu\text{m}$ , při posuvu na zub  $f_z = 0,15$  mm, strojní čas je  $t_{AS} = 1,10$  s,
- nejnižší hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 1,49$   $\mu\text{m}$  byla naměřena pro řeznou rychlost  $v_c = 300$  m/min, bez ohledu na strojní čas, při posuvu na zub  $f_z = 0,03$  mm,
- nejvyšší hodnota drsnosti povrchu  $R_a = 4,6$   $\mu\text{m}$  byla naměřena pro řeznou rychlost  $v_c = 400$  m/min, ovšem strojní čas byl nejkratší a to  $t_{AS} = 0,55$  s,
- pro řeznou rychlost  $v_c = 200$  m/min nepřesáhla ani jedna z hodnot drsnosti povrchu  $R_a$  limitní hodnotu, stanovenou na  $R_a = 3,2$   $\mu\text{m}$ , ani pro jeden posuv na zub,
- testovat by bylo pravděpodobně vhodnější za použití i vyšších řezných rychlostí, to však nese riziko pro použitý nástroj,
- nižší hodnoty drsnosti povrchu lze dosáhnout, ovšem na úkor strojního času.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [2] KOČMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [3] Sandvik Coromant. *Produktivní obrábění kovů*. Sandviken: Sandvik Coromant, 1997, 300 s.
- [4] BORO VAN, Petr. Řezné nástroje (3). *Technický týdeník* [online]. 2011, [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-12\\_8524.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-12_8524.html)
- [5] Seco Tools CZ. *Frézování: příručka pro technology*. Brno: Seco Tools CZ s r.o., 2013, 22 s. barevné ilustrace a obrázky.
- [6] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI\\_TO-1cast.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf)
- [7] ZEMČÍK, Oskar, *Nástroje a přípravky na obrábění*. [přednáška]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 14. 3. 2017.
- [8] *Fréza válcová čelní, polohrubozubé, typ N*. katalog firmy ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/hledani/detail/frezy-valcove-celni,-polohrubozube,-typ-n,-din-841,-rychlorezna-ocel-hss-co5/>
- [9] *Fréza válcová čelní krátká, typ N ploška Weldon*. katalog firmy ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.zps-fn.cz/frezy-valcove-celni-hss/detail/frezy-valcove-celni-kratke,-1-brit-pres-stred,-typ-n,-ploska-weldon,-din-844k,-rychlorezna-ocel-hsse-pm1/>
- [10] HUMÁR, Anton. *Technologie I: Základní metody obrábění - 1. část* [online]. Interaktivní multimediální text pro magisterskou formu studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/zakl\\_met\\_obr/zakl\\_met\\_obr\\_1.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/oporysave/zakl_met_obr/zakl_met_obr_1.pdf)
- [11] *Obráběcí stroje pro frézování*. Sandvik Coromant. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting\\_started/machines\\_for\\_milling/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/machines_for_milling/pages/default.aspx)
- [12] MIKULOVÁ, Michaela. *Frézovací stroje současné produkce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Blecha, PhD.

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	46
---------	------------------	------	----

- [13] KAMENICKÁ, Pavlína. *Způsoby upínání nástrojů a obrobků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Kalivoda.
- [14] *Upínání nástrojů*. [elektronická učebnice]. Elektronická učebnice-Olomoucký kraj, [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/sections/1228>
- [15] BORO VAN, Petr. Upínače nástrojů (2). *Technický týdeník* [online]. 2012, [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2\\_8498.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2_8498.html)
- [16] ŘÍMOVSKÝ Pavel a Jaroslav MUDRÁK. *Příprava stroje před obráběním – upínání obrobků a vyrovnání svěráku*. [prezentace]. In: Elektronická učebnice [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1229/komponenty/1606/show\\_ppt](https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1229/komponenty/1606/show_ppt)
- [17] CARBIDE. *Řezné podmínky pro stopkové frézy ze slinutého karbidu*. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.carbide.cz/doplňkové-informace/rezne-podminky-pro-stopkove-frezy-z-tvrdokovu/>
- [18] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
- [19] DE VOS, Patrick. Řezné materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, (6) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technologie-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
- [20] Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, (4) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
- [21] Prášková metalurgie a její využití. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002, (11) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/praskova-metalurgie-a-jeji-vyuziti.html>
- [22] Sandvik Coromant. *Povlakované slinuté karbidy*. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting\\_tool\\_materials/coated\\_cemented\\_carbide/pages/default.aspx](http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx)
- [23] Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2002, (4) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	47
---------	------------------	------	----

- [24] BORO VAN, Petr. Řezné nástroje (3). *Technický týdeník* [online]. 2011, [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-3\\_8515.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-3_8515.html)
- [25] *Katalog povlaků*. LISS – povlakování. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.liss.cz/files/katalog\\_povlaku.pdf](http://www.liss.cz/files/katalog_povlaku.pdf)
- [26] PLÁNIČKA, František. PKD a CBN nástroje zvyšují produktivitu. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2016, (10) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/pkd-a-cbn-nastroje-zvysuji-produktivitu.html>
- [27] Laserem vyrobený utvařec TiroWave pro běžné obrábění, úhel čela 15° až 20°, negativní fazetka 0,08 mm. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-se-silnou-vrstvou-cvd-diamantu.html>
- [28] VBD GC4230 s CVD povlakem. In: *Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/milling-inserts-grades-steel/pages/default.aspx>
- [29] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy: hutnické výrobky a jejich použití*. Praha: SNTL, 1957, 219 s.
- [30] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. Vydání první. Ústí nad Labem: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014, 245 stran. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [31] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. ISBN 80-89041-88-4.
- [32] SEDLÁČEK, Vladimír. *Neželezné kovy a slitiny*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979, 398 s.
- [33] Nové obrobitelné slitiny hliníku bez olova. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2001, (7) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nove-obrobitelne-slitiny-hliniku-bez-olova.html>
- [34] PODRABSKÝ, Tomáš, Martin JULIŠ, Karel NĚMEC. Neželezné kovy a jejich slitiny [přednáška]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, In: Ústav materiálového inženýrství [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura\\_a\\_vlastnosti\\_materialu/prednasky/09%20-%20Nezelezne%20kovy%20A.pdf](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/09%20-%20Nezelezne%20kovy%20A.pdf)
- [35] Hydraulický upínač Schunk Tendo. In: *Technický týdeník* [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2\\_8498.html](http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/upinace-nastroju/upinace-nastroju-2_8498.html)

FSI VUT	BAKALÁŘSKÁ PRÁCE	List	48
---------	------------------	------	----

- [36] *Chemické složení a vlastnosti slitiny ČSN 424203*. Proal [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.proal.cz/info/424203.htm>
- [37] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [38] ŠULC, František. *Vady a jejich příčiny při barvení eloxovaných povrchů*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubiček
- [39] ZPS-FRÉZOVACÍ NÁSTROJE. *Fréza válcová čelní dlouhá, 2 břity do středu, 38°, typ W, Weldon ploška*. [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://www.zps-fn.cz/frezy-valcove-celni-sk/detail/frezy-valcove-celni-dlouhe,-2-brity-do-stredu,-38-,-typ-w,-weldon-ploska,-slinute-karbidy-\(sk\)/](https://www.zps-fn.cz/frezy-valcove-celni-sk/detail/frezy-valcove-celni-dlouhe,-2-brity-do-stredu,-38-,-typ-w,-weldon-ploska,-slinute-karbidy-(sk)/)
- [40] *Portálové obráběcí centrum MCV 1210* [online]. Tajmac-zps, technická data. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [http://www.tajmac-zps.cz/sites/tajmac-zps-2.os.zps/files/mcv1210\\_cz.pdf](http://www.tajmac-zps.cz/sites/tajmac-zps-2.os.zps/files/mcv1210_cz.pdf)
- [41] ISCAR. Vysokorychlostní obrábění – klíč k vyšší produktivitě. MM průmyslové spektrum [online]. 2010, (3) [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokorychlostni-obrabeni-klic-k-vyssi-produktivite.html>
- [42] ŠPERKA, Petr. *Struktura povrchu vybraných strojních součástí* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2009 [cit. 2017-04-28], 27 s. Dostupné z: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura\\_povrchu\\_vybranych\\_tecnologii\\_obrabeni.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/vyuka/Struktura_povrchu_vybranych_tecnologii_obrabeni.pdf)
- [43] BUMBÁLEK, Bohumil. *Fyzikální podstata řezání* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2005 [cit. 2017-04-28], 125 s. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz\\_pods\\_rez/Opora05\\_Fyzikalni\\_podstata\\_rezani.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/fyz_pods_rez/Opora05_Fyzikalni_podstata_rezani.pdf)
- [44] ČECH, Jiří. *Program pro experimentální část*.
- [45] *Drsnoměr Surtronic S128* [online]. Taylor Hobson, technická specifikace. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/12056018-Surtronic-rada-s-100-robustni-a-prenosne-drsnomery.html>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>CNC</b>	[-]	Computer Numerical Controlled – číslicové řízení počítačem
<b>CNN</b>	[-]	celostátní normy a normativy
<b>CVD</b>	[-]	Chemical Vapour Deposition – chemické napařování
<b>HB</b>	[-]	tvrdost podle Brinella
<b>HSM</b>	[-]	High Speed Milling – vysokorychlostní frézování
<b>HV</b>	[-]	tvrdost podle Vickerse
<b>MCV 1210</b>	[-]	označení použitého stroje
<b>MP</b>	[-]	víceúčelový povlak
<b>MTCVD</b>	[-]	Middle Temperature CVD – metoda CVD za středních teplot
<b>NC</b>	[-]	Numerical Control – číslicově řízený
<b>PACVD</b>	[-]	Plasma Activated CVD – plazmou aktivovaná CVD
<b>PKD</b>	[-]	polykrystalický diamant
<b>PKNB</b>	[-]	polykrystalický kubický nitrid bóru
<b>PVD</b>	[-]	Physical Vapour Deposition – fyzikální napařování
<b>SK</b>	[-]	slinutý karbid
<b>T3; T4</b>	[-]	stav tepelného zpracování
<b>TZ</b>	[-]	tepelné zpracování
<b>VBD</b>	[-]	vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
<b>A</b>	[%]	tažnost
<b>D</b>	[mm]	průměr nástroje
<b>K<sub>v</sub></b>	[-]	součinitel obrobitelnosti
<b>L</b>	[mm]	dráha nástroje ve směru posuvového pohybu
<b>R<sub>a</sub></b>	[μm]	střední aritmetická hodnota drsnosti
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	mez pevnosti
<b>R<sub>p</sub></b>	[MPa]	mez kluzu
<b>R<sub>z</sub></b>	[μm]	nejvyšší výška profilu
<b>S128</b>	[-]	označení drsnoměru
<b>T</b>	[min]	trvanlivost
<b>VB</b>	[mm]	opotřebení na hřbetu
<b>a</b>	[nm]	parametr mřížky
<b>a<sub>p</sub></b>	[mm]	šířka záběru ostří
<b>f<sub>n</sub></b>	[mm]	posuv na otáčku
<b>f<sub>z</sub></b>	[mm]	posuv na zub
<b>n</b>	[1/min]	otáčky nástroje
<b>t<sub>AS</sub></b>	[min]	strojní čas
<b>v<sub>c</sub></b>	[m/min]	řezná rychlost
<b>v<sub>f</sub></b>	[mm/min]	posuvová rychlost
<b>z</b>	[-]	počet břitů nástroje
<b>ρ</b>	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Tělo programu pro experimentální část [44]  
Příloha 2      Technické specifikace drsnoměru Surtronic S128 [45]

## **PŘÍLOHA 1**

Tělo programu pro experimentální část:

G54T="FR\_10"M6G0

Z100G0

X10.5

Y-30G1

Z-2

F5000M3

S3183

M8M0G1

Y100

F382;

1.POSUVG1 X26G4 F2G1 Y-30 F764;

2.POSUVG1 X41.5G4 F2G1 Y100 F1146;

3.POSUVG1 X57G4 F2G1 Y-30 F1528;

4.POSUVG1 X72.5G4 F2G1 Y100 F1910;

5.POSUVM5G1 Z100G1 Y200M30

## PŘÍLOHA 2

Technické specifikace drsnoměru Surtronic S128

<b>Typ snímače</b>	indukční	
<b>Hmotnost</b>	0,5 kg	
<b>Zdroj napětí</b>	Li Poly dobíjecí baterie	
<b>Nabíječka</b>	USB 5V 1A 110 – 240 VAC 50/60 Hz	
<b>Rozsah měření</b>	400/100/10 $\mu\text{m}$	
<b>Rozlišení</b>	50/10/5 nm	
<b>Systémový šum Ra</b>	150/100/50 nm	
<b>Opakovatelnost Ra</b>	0,5 % z hodnoty + systémový šum	
<b>Měřicí síla</b>	150–300 mg	
<b>Snímací hrot</b>	diamantový 5 $\mu\text{m}$ není-li specifikováno jinak	
<b>Cut off</b>	0,25; 0,8; 2,5 mm	
<b>Filtr</b>	2CR nebo Gauss	
<b>Vyhodnocovaná délka</b>	0,25 – 25 mm	
<b>Kapacita baterie na jedno nabití</b>	2 000 měření	
<b>Pracovní podmínky</b>	<b>Teplota</b>	0 až 40 °C
	<b>Vlhkost</b>	0 až 80 % bez kondenzace
<b>Max. rozsah osy X</b>	25,5 mm	
<b>Rychlost snímání</b>	1 mm/s	